

PAT-NO: JP404190598A  
DOCUMENT- JP 04190598 A  
IDENTIFIER:  
TITLE: MAGNETIC FIELD MEASURING METHOD FOR ELECTROMAGNET  
FOR PARTICLE ACCELERATING DEVICE

PUBN-DATE: July 8, 1992

INVENTOR-INFORMATION:

NAME COUNTRY  
HONJO, ICHIRO

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME COUNTRY  
FUJITSU LTD N/A

APPL-NO: JP02319437

APPL-DATE: November 22, 1990

INT-CL (IPC): H05H007/04 , G01R033/02

US-CL-CURRENT: 315/501

ABSTRACT:

PURPOSE: To perform the magnetic field measurement of an electromagnet with high accuracy and reliability by seeking the displacement of the measured position based on the measured result of the magnetic field and correcting the measured result according to the displacement to seek the magnetic field strength at the real position.

CONSTITUTION: A measuring device 13A is moved against a particle accelerating electromagnet 2 fixed, in a specified position, on a rack 11A and having a symmetrical shape, so as to measure magnetic fields at respective measurement positions of the electromagnet 2, and the real position of the electromagnet 2 is obtained based on the asymmetry of the measured values at least at both ends of the electromagnet 2 due to the measurement process. And, according to the

displacement relative to the specified position during measuring the obtained real position, the measured value on measurement is corrected such that it is equal to the measured value on the electromagnet 2 provided at the real position. Thus, the process for seeking the real position of the electromagnet 2 and the process for correcting the measured value co-operate so as to cancel the magnetic field measurement error caused by the aforementioned error, even in a case where there has been an error in specifying the position of the electromagnet 2. Consequently, the magnetic field measurement with high reliability can be performed.

COPYRIGHT: (C)1992,JPO&Japio

## ⑫ 公開特許公報(A)

平4-190598

⑤ Int. Cl.<sup>5</sup>

識別記号

庁内整理番号

④ 公開 平成4年(1992)7月8日

H 05 H 7/04  
G 01 R 33/029014-2G  
8203-2G

審査請求 未請求 請求項の数 1 (全12頁)

⑥ 発明の名称 粒子加速器用電磁石の磁場測定方法

⑪ 特 願 平2-319437

⑫ 出 願 平2(1990)11月22日

⑬ 発 明 者 本 荘 一 郎 神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地 富士通株式会社  
内

⑭ 出 願 人 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地

⑮ 代 理 人 弁理士 伊東 忠彦 外2名

## 明 細 書

の磁場測定方法。

## 1. 発明の名称

粒子加速器用電磁石の磁場測定方法

## 3. 発明の詳細な説明

〔概要〕

シンクロトン放射光発生装置の部品である偏向電磁石の磁場を測定する方法に関し、

信頼性の高い磁場測定を可能とすることを目的とし、

架台に固定されて位置を特定された対称な形状を有する粒子加速器用電磁石に対して測定器を移動させて上記電磁石の各測定位置の磁場を測定する工程と、該測定工程による、少なくとも上記電磁石の両側の端部の測定値の非対称に基づいて上記電磁石の真の位置を求める工程と、上記求めた真の位置の上記測定時に特定された位置に対するずれに応じて、上記測定時の測定値を上記真の位置の電磁石上の測定値となるように補正する工程とより構成する。

## 2. 特許請求の範囲

架台(11A)に固定されて位置を特定された対称な形状を有する粒子加速器用電磁石(2)に対して測定器(13A)を移動させて上記電磁石の各測定位置の磁場を測定する工程(35, 20~23)と、

該測定工程による、少なくとも上記電磁石の両側の端部(2a, 2b)の測定値の非対称に基づいて上記電磁石の真の位置を求める工程(36, 50, 51)と、

上記求めた真の位置の上記測定時に特定された位置に対するずれに応じて、上記測定時の測定値を上記真の位置の電磁石上の測定値となるように補正する工程(37, 52)と、

よりなることを特徴とする粒子加速器用電磁石

〔産業上の利用分野〕

本発明はシンクロトロン放射光発生装置の部品である偏向電磁石の磁場を測定する方法に関する。

半導体の高密度化を可能とするX線露光技術が研究されつつある。

露光用X線の光源の一つとして、第11図に示すシンクロトロン放射光発生装置1がある。

2は偏向電磁石(第12図参照)、3は四極電磁石、4は高周波加速空洞、5は真空ダクト、6は入射器である。7はビームラインであり、偏向電磁石2の個所で発生したX線(シンクロトロン放射光)をウェハ露光部へ導く。

ウェハを露光するためのX線は、強度が高く且つ安定である必要がある。

上記の装置1からこのようなX線を取り出すには、多数の荷電粒子が安定に周回する必要があり、このためには、偏向電磁石2は、十分に均一な磁場分布を形成しうるものであることが要求される。

特に偏向電磁石2では、第12図の座標系において、中心磁場強度からのずれ $\Delta B/B$ 。(ここ

でB。は $B(X=0, S=0)$ であり、 $\Delta B$ は $B(X, S)-B$ 。である)が $5 \times 10^{-4}$ 以下(Xが $\pm 50$  mm以内)である必要がある。

また、粒子が偏向電磁石2をS軸に沿って通過していく間に実効的に感じる磁場強度という意味で、偏向電磁石では

$$\int B(X, S) ds$$

で定義される積分磁場強度の分布も均一でなければならない。

第13図中線Iで示すように、Xが $\pm 50$  mmの範囲で、

$$\Delta \int B(X, S) ds / \int B(0, S) ds$$

が $1 \times 10^{-3}$ 以下である必要がある。

偏向電磁石2において、このような高精度な磁場分布を得るには、偏向電磁石2の磁極2c、

2dの部分が $\mu$ mオーダーで高精度に加工される必要があると共に、磁場を高精度に測定する方法が必要とされる。

電磁石2の磁極端部2aのように磁場強度が急激に変化する部位については、測定位置が0.5 mm

- 3 -

ずれただけで50 Gaussも変化してしまう。

この点でも、磁場の測定には相当の高精度が要求される。

〔従来の技術〕

従来は、第14図に示す構造の測定装置10を使用して第15図に示す工程を経て、磁場分布を測定していた。

第14図中、11は架台であり、ここに測定対象物である偏向電磁石2が載置固定される。

12はx-y移動ステージであり、ホール素子よりなる測定器13を移動させる。

偏向電磁石2には、第12図及び第16図に示すように上端を尖状とした永久磁石であるパイロット磁石14-1、14-2が二個所に設けてある。

電磁石2の各部の寸法及び円弧の中心位置等は予め測定して求められている。

まず、第1段階のパイロット磁石位置測定工程20を行う。

この工程20では、架台11上に載置固定され

- 4 -

た電磁石2のパイロット磁石14-1、14-2の位置を電磁石2の基準面16を基準として、マイクロメータ等を使用して測定し、第16図に示すように、パイロット磁石14-1、14-2の電磁石2の電磁石X-Y座標系における座標 $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ を求める。電磁石X-Y座標系の原点は、上記電磁石2の円弧の中心である。

次いで、第2段階のパイロット磁石位置測定工程21を行う。

この工程21では、移動ステージ12を動作させて測定器13を第16図中二点鎖線で示すように移動させ、測定器13によって、上記パイロット磁石14-1、14-2の位置を検出し、パイロット14-1、14-2の移動ステージ12のx-y座標系である測定座標系における座標 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ を求める。

次いで、測定座標系を電磁石座標系に変換する変換式を求める工程22を行う。

この工程22においては、

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ -B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ -B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} \quad (2)$$

の四元連立方程式を解き、係数 A, B, C, D を求める。

これにより、測定座標系を電磁石座標系へ変換する変換式が求まる。

次いで磁場測定工程 23 を行う。

この工程 23 においては、上記の工程 22 で求めた係数 A, B, C, D を上記式(1), (2)に代入してなる両座標系の変換式に基づいて、移動ステージ 12 を動作させて測定器 13 を電磁石座標系における所定の測定位置へ順次移動させ、磁場を測定する。

次いで磁場分布を求める工程 24 を行う。

この工程では、工程 23 において得た各所定位置の磁場の強さを処理して、例えば第 17 図中、線 30 ~ 34 で示すような磁場分布が求められる。

線 30 は磁場の強さが 7 K G である位置を結ん

だ線であり、以下、等高線という。

同じく線 31 は磁場の強さが 7.5 K G の位置を結んだ等高線、線 32, 33, 34 は夫々磁場の強さが 8 K G, 8.5 K G, 9 K G の位置を結んだ等高線である。

第 17 図中、符号 39 は、電磁石座標系における偏向電磁石 2 の輪郭(位置)を示す。

(発明が解決しようとする課題)

上記測定方法では、前記の工程 20 において、電磁石 2 の基準面 16 に対するパイロット磁石 14-1, 14-2 の位置が精度良く測定されること、且つ工程 21 においてパイロット磁石 14-1, 14-2 の測定座標系における座標が正確に求められていることが、磁場測定を高精度に行われるための前提条件である。

ところで電磁石 2 は長さが数 m という相当に大型のものであるため、工程 20 における測定誤差が磁場測定精度上無視出来ない程(1 mm 以下)にまで大きくなる場合もある。

- 7 -

また、工程 21 において、測定器 13 がパイロット磁石 14-1, 14-2 の尖端と正確に一致している保証はなく、僅かのずれがあることもありうる。

このため、従来の測定方法は、測定位置を電磁石 2 の真の位置より僅かではあるけれどもずれた位置を電磁石 2 の真の位置と見間違がって測定を行っている虞れがあり、磁場測定結果に十分な信頼性を保証できない。

従って、この磁場測定結果に基づいて偏向電磁石 2 の各部を微細に補正した場合には、完成した偏向電磁石は、実際には磁場分布の均一性が乱れたものとなってしまう、最終的には、シンクロトン放射線発生装置より発生する X 線の強度が損なわれてしまうことになる。

本発明は、信頼性の高い磁場測定を可能とした粒子加速器用電磁石の磁場測定方法を提供することを目的とする。

- 8 -

(課題を解決するための手段)

本発明は、第 1 図に示すように、架台に固定されて位置を特定され、対称な形状を有する粒子加速器用電磁石に対して測定器を移動させて上記電磁石の各測定位置の磁場を測定する工程 35 と、

該測定工程による、少なくとも上記電磁石の両側の端部の測定値の非対称に基づいて上記電磁石の真の位置を求める工程 36 と、

上記求めた真の位置の上記測定時に特定された位置に対するずれに応じて、上記測定時の測定値を上記真の位置の電磁石上の測定値となるように補正する工程 37 とよりなる構成である。

(作用)

電磁石の真の位置を求める工程 36 と、測定値を補正する工程 37 とは、協働して、電磁石の位置の特定に誤差があった場合であっても、この誤差による磁場測定誤差を無くする。

〔実施例〕

第2図に本発明の一実施例になる粒子加速器用偏向電磁石の磁場測定方法を示す。

第3図は磁場測定を行う測定装置を示し、第4図は第3図中x-y移動ステージを示す。

この測定装置40は、第14図に示す測定装置10と実質上同じ構造であり、対応する部分は添字Aを付した同一符号で示す。

41はx方向移動用ステージ、42はy方向移動用移動ステージである。

偏向電磁石2の磁場を測定するには、まず、従来と同様に、工程20～24までを行う。

この工程20～24については説明を省略する。

次に、工程24で求めた磁場分布に基づいて電磁石2の電磁石座標系における真の位置を求める工程50を行う。

この工程50においては、電磁石2の長手方向上両側の端部2a、2bは高精度に対称に形成されており、端部2a、2bの部位の等高線も端部2a、2bと平行となって左右対称となる筈である筈である。

- 11 -

である筈である。

次に、上記工程50における電磁石2の真の位置62の具体的な求め方について説明する。

(1) まず、回転角 $\alpha$ を得る。

① 第6図中、 $-10^\circ$ 側の等高線から丁度測定系 $-10^\circ$ 線上、S軸上の点Pにある磁場強度を $B_1$ として、同じ $B_1$ の強さを持つ $+10^\circ$ 側のS軸上の点をQとする。

② 等高線の傾き $\alpha$ から、電磁石系の偏向中心は第6図点0'の位置にあると仮定する。点Qの位置から $\Delta\theta_1$ も既知であり、 $\theta_0$ 、 $\rho_0$ も既知である。従って、点P、Qの座標は

$$(x_p, y_p) = (\rho_0, 0)$$

$$(x_0, y_0) = (\rho_0 \cdot \cos(\theta_0 - \Delta\theta_1), \rho_0 \cdot \sin(\theta_0 - \Delta\theta_1))$$

と求まる。

③ 線分 $\ell_0$ 、 $\ell_p$ の式は、

$$\ell_0 \cdots \rightarrow y - y_0 = \tan(\theta_0 - \alpha) \cdot (x - x_0)$$

$$\ell_p \cdots \rightarrow y = -\tan \alpha \cdot (x - \rho_0)$$

るということを前提として、真の位置を求めている。

第17図及び第5図中、60-1～60-nは、電磁石座標系上電磁石2の右端部2aに沿う測定位置であり、61-1～61-nは、左端部2bに沿う測定位置である。

各測定位置60-1～60-n、61-1～61-nで測定した磁場の強度の分布が、第17図中線30～34で示すようになったとする。

この磁場分布は非対称であり、第17図中、右側の端部2a側の磁場分布は、内周寄り側が外周寄り側に比べて張り出しており、左側の端部2b側の磁場分布は、右側端部2a側とは逆に、外周寄りが内周寄りに比べて外に張り出しているのが分かる。

従って、前記工程20～22によって得た電磁石座標系は真の電磁石座標系と一致していず、ずれがあり、電磁石2の真位置は、第5図中符号62で示すように前記工程20～22によって得た位置35に対して時計方向に若干回動した位置

- 12 -

となる。よって点0'の座標は

$$\begin{cases} x_0 = \frac{y_0 - \rho_0 \cdot \tan \alpha - \tan(\theta_0 - \alpha) \cdot x_0}{- (\tan \alpha + \tan(\theta_0 - \alpha))} \\ y_0 = -\tan \alpha (x_0 - \rho_0) \end{cases}$$

と求まる。

(2) 次に原点移動( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ )を得る。

実際は上記( $x_0$ ,  $y_0$ )の平行移動だけではS軸と直交する半径方向に見た磁場分布はS軸を中心に左右対称にはならない。そこで、0'の位置をPQの二等分線上( $\ell_0$ 、 $\ell_p$ )に微調してこの対称性を合わせる。即ち、第6図中、 $\overline{0'P} = \rho_0$ となるように $\ell_0$ 、 $\ell_p$ 線分上で0'を移動する。

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}$$

以上により、回転角 $\alpha$ と原点移動( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ )が得られる。

次に、電磁石2の新座標を求める工程51を行う。

この工程51では、電磁石座標系上における真の位置の電磁石2の新座標( $X'$ ,  $Y'$ )を次式

により求める。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix}$$

次に、既測定値から新座標系上での磁場強度を補間によって求める工程 52 を行う。

具体的には、第 7 図に示すように行う。ある位置 P、で測定値 B、を得たとする。これは電磁石座標系では P、という位置ではない。そこで電磁石座標系での P、に相当する位置を原点移動と回転によって P、と求める。これが新座標である。P、での磁場強度はまわりの P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub> から線形補間して求められる。即ち、測定座標系での各測定位置が電磁石座標系でどこにあるかを測定座標系によって知り、周りの測定値から補間によって新座標での磁場強度を知る。

上記の補間を各測定点について行い、この後、磁場分布を求める工程 53 を行う。

この工程では、前記の工程 24 と同様に処理が行われる。

これにより、第 17 図中の等高線 30 ~ 34 は

- 15 -

周側と外周側とが対称となるものとなった。

第 10 図 (A) は電磁石 2 の +10° の位置の径方向上の磁場の測定結果を示し、同図 (B) は補正後の結果を示す。

測定結果は、同図 (A) 中、線 80 で示すように、外周側が低く内周側が高いという非対称であったけれども、補正をしたことにより、同図 (B) 中、線 81 で示すように、中心に対して内周側と外周側とが対称となるものとなった。

電磁石 2 が精度良く製作されている以上、本来は -10°、+10° の位置における径方向上の磁場の強度は中心に関して対称となる筈であり、上記の結果より、上記の補正は適切なものであることがわかる。

なお、本発明は、上記実施例に限らず、四極電磁石 3 の磁場の測定にも適用可能である。

(発明の効果)

以上説明した様に、本発明によれば、磁場の測定結果に基づいて、測定位置のずれを求め、この

第 8 図中、符号 30A ~ 34A で示すように描き直される。

この等高線 30A ~ 34A が示す磁場分布は、上記工程 20、21 における測定誤差を補正されたものであり、従来に比べて高精度であり且つ信頼性の高いものとなる。

従って、上記にあって得た磁場分布に基づいて電磁石 2 の各部を微細に補正することにより、磁場分布が十分に均一である偏向電磁石を製造することが出来る。

この偏向電磁石を使用することにより、第 11 図の放射線発生装置からは従来に比べて強度の高い安定した X 線が取り出される。

第 9 図 (A) は電磁石 2 の -10° の位置の径方向上の磁場の測定結果を示し、同図 (B) は補正後の結果を示す。

測定結果は、第 9 図 (A) 中、線 70 で示すように、内周側が低く外周側が高いという非対称であったけれども、補正をしたことにより、同図 (B) 中、線 71 で示すように、中心に対して内

- 18 -

ずれに応じて上記測定結果を補正して真の位置における磁場を求める構成であるため、電磁石の位置に誤差があった場合であっても、この誤差が無い状態における電磁石の磁場を求めることが出来る。

このため、従来に比べて、電磁石の磁場測定をより高精度に且つ信頼性良く行うことが出来る。

また、この測定結果を利用することにより、高精度磁場分布をもつ粒子加速器用電磁石を製作することが出来る。

#### 4. 図面の簡単な説明

第 1 図は本発明の原理構成図、

第 2 図は本発明の粒子加速器用電磁石の磁場測定方法の一実施例を示す図、

第 3 図は本発明の磁場測定方法に使用する装置を示す図、

第 4 図は第 3 図中、移動ステージを示す図、

第 5 図は電磁石座標系上の電磁石の位置と電磁石の真の位置との関係を示す図、

第 6 図は電磁石の回転移動及び原点移動を説明する図、

第 7 図は測定値の補間を説明する図、

第 8 図は補間した後の磁場分布を示す図、

第 9 図は偏向電磁石の  $-10^\circ$  の位置の測定結果と補正後の結果とを対比して示す図、

第 10 図は偏向電磁石の  $+10^\circ$  の位置の測定結果と補正後の結果とを対比して示す図、

第 11 図はシンクロトロン放射光発生装置を示す図、

第 12 図は第 11 図中の偏向電磁石を示す図、

第 13 図は第 10 図の偏向電磁石の積分磁場強度分布を示す図、

第 14 図は磁場測定装置の概略構成図、

第 15 図は従来の磁場測定方法を示す図、

第 16 図は電磁石座標系と測定座標系との関係を示す図、

第 17 図は測定によって得た磁場分布を示す図である。

図において、

1 はシンクロトロン放射光発生装置、

2 は偏向電磁石、

13 A は測定器、

14-1, 14-2 はパイロット磁石、

30 ~ 34 は測定結果に基づく等高線、

30 A ~ 34 A は描き直された等高線、

35 は磁場測定工程、

36 は電磁石の真の位置を求める工程、

37 は測定値補正工程、

39 は電磁石の位置、

40 は磁場測定装置、

41 は x 方向移動ステージ、

42 は y 方向移動用ステージ

50 は電磁石の真の位置を求める工程、

51 は電磁石の新座標を求める工程、

52 は補間して新座標での磁場を求める工程、

53 は磁場分布を求める工程、

60-1 ~ 60-n, 61-1 ~ 61-n は測定位置、

62 は偏向電磁石の真の位置

- 10 -

- 20 -

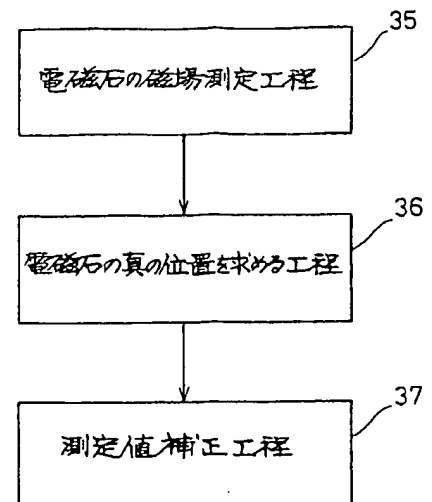
を示す。

特許出願人 富士通株式会社

代理人 弁理士 伊 東 忠 彦

同 弁理士 松 浦 兼 行

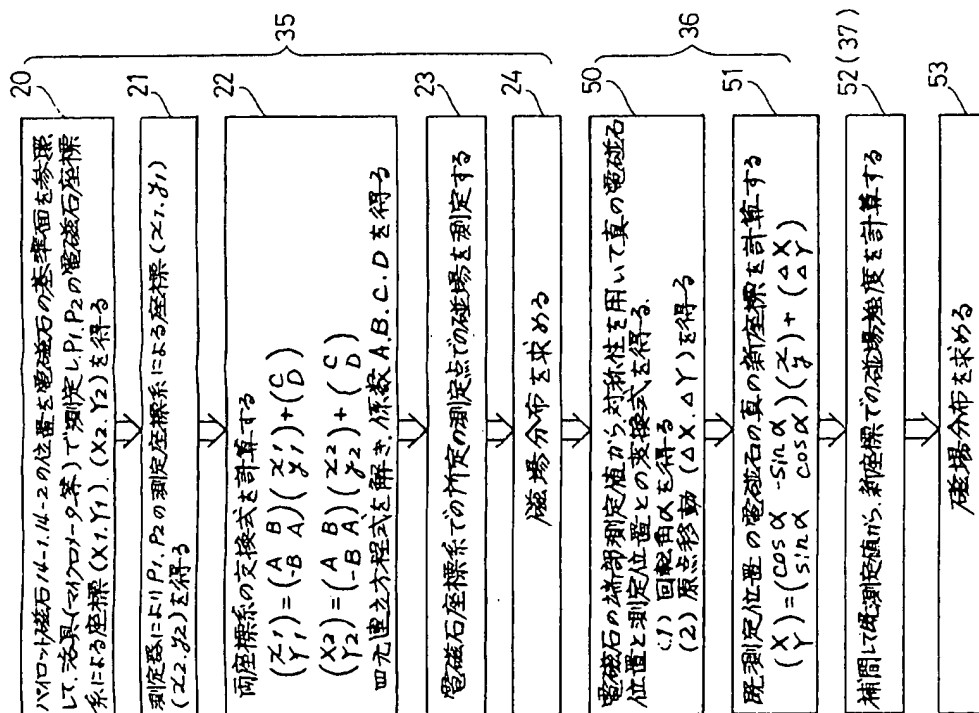
同 弁理士 片 山 修 平



本発明の原理構成図

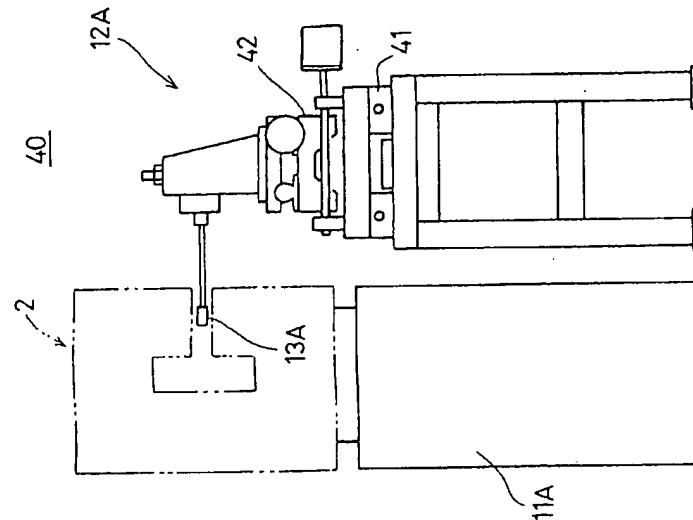
第 1 図





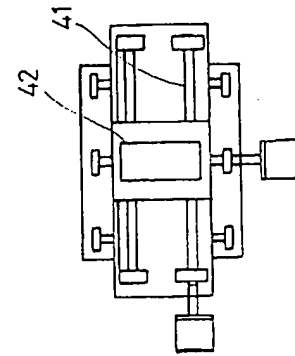
本発明の粒子加速器用電磁石の磁場測定方法の一実施例を示す図

第2図



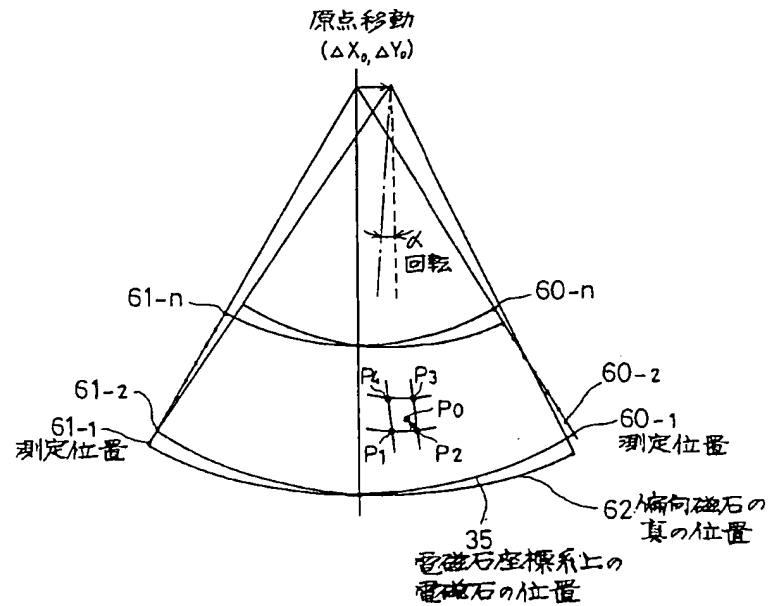
本発明の磁場測定方法に使用する装置を示す図

第3図



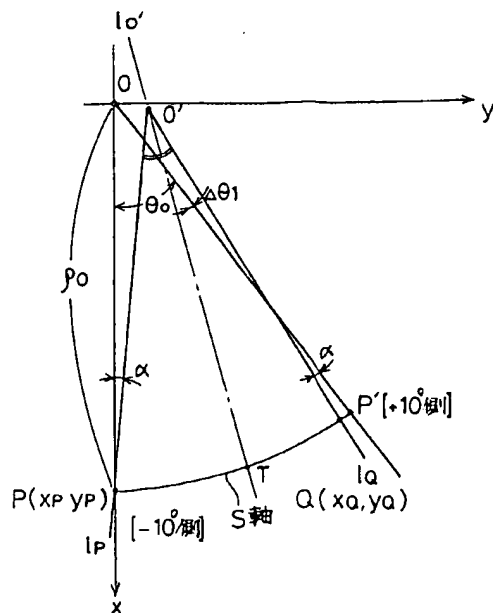
第3図中移動ステージを示す図

第4図



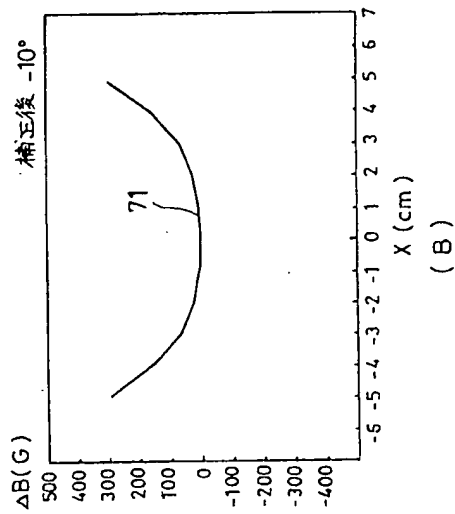
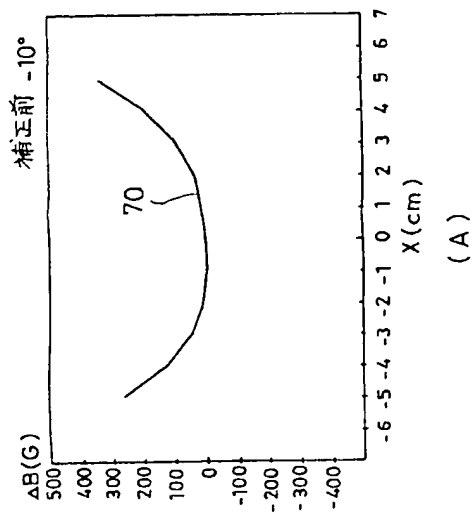
電磁石座標系上の電磁石の位置と電磁石の真の位置との関係を示す図

第 5 図



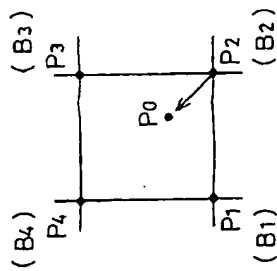
電磁石の回転移動及び原点移動を説明する図

第 8 圖



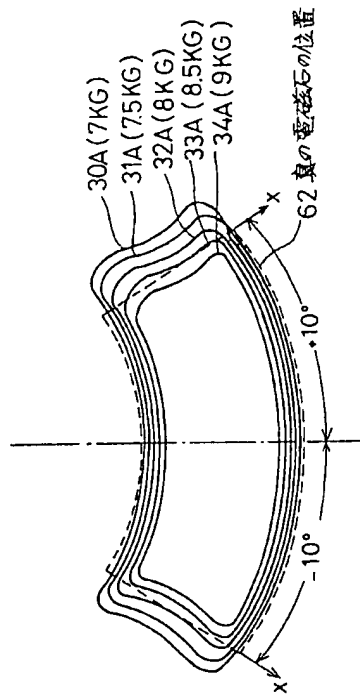
偏向隠磁石の-10°の位置の測定結果と補正後の結果とを対比して示す図

第 9 図



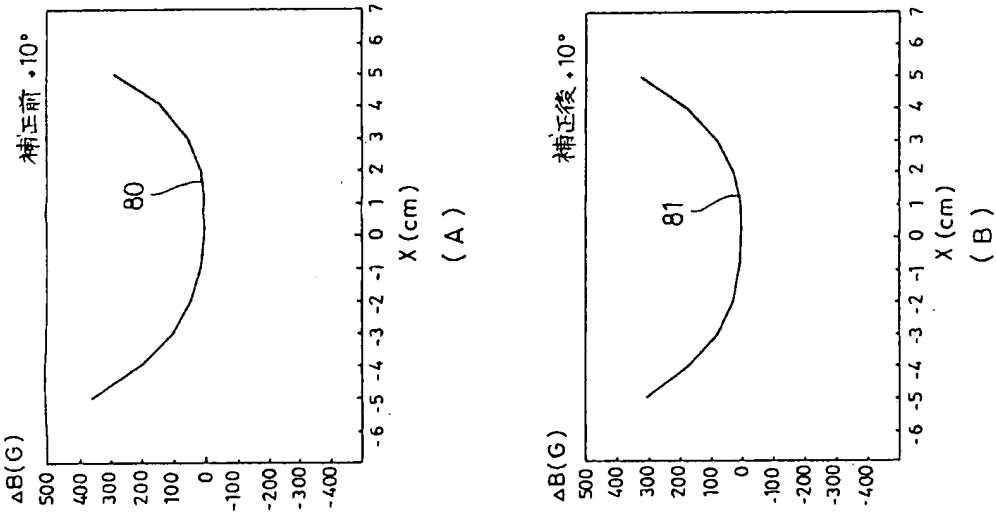
測定値の補間を説明する図

第 7 図



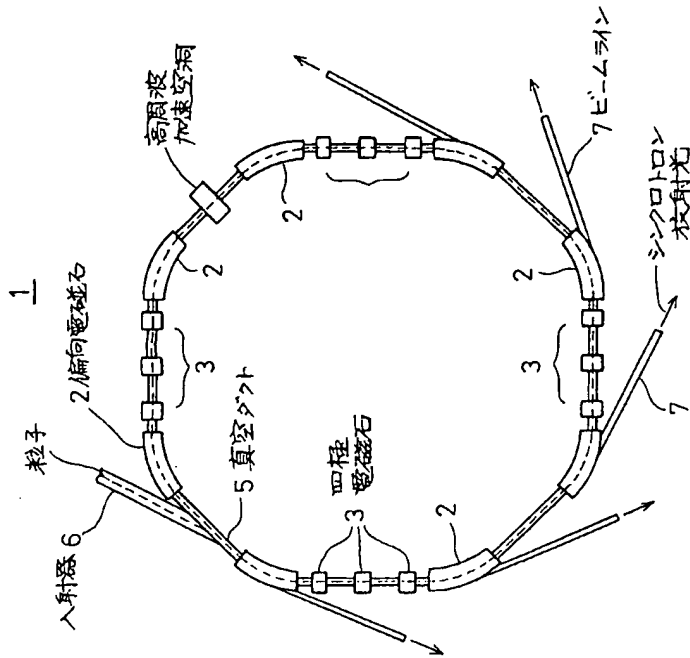
補間した後の磁場分布を示す図

第 8 図



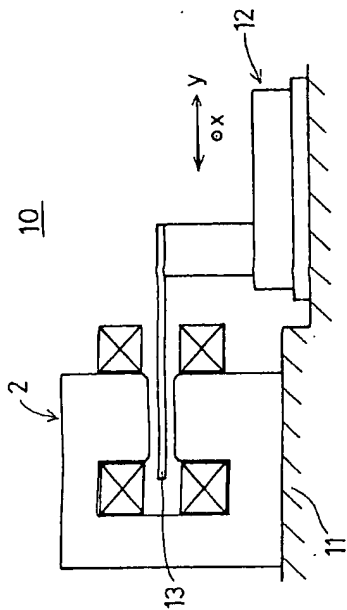
偏向電磁石の+10°の位置の測定結果と補正後の結果とを対比して示す図

第10図



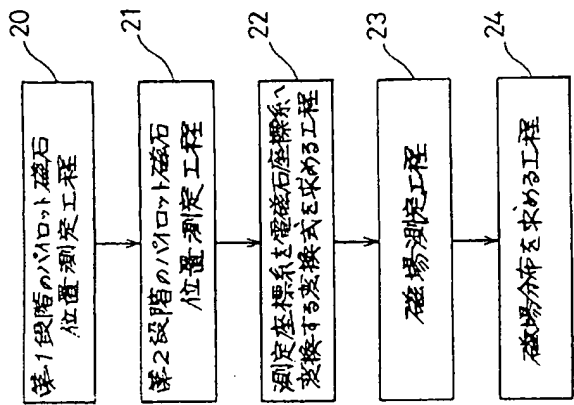
シンクロトロン放射光発生装置を示す図

第11図



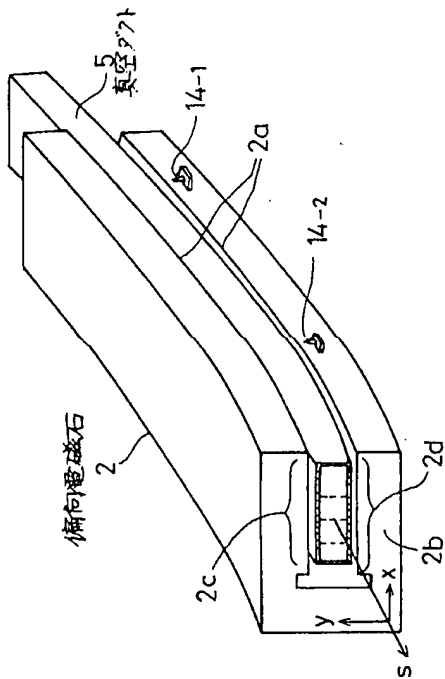
磁場測定装置の概略構成図

第 14 図



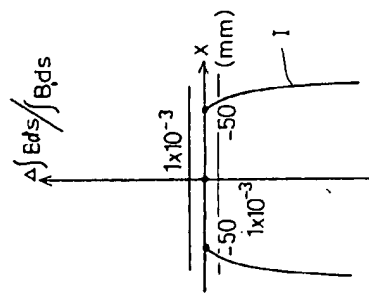
従来の磁場測定方法を示す図

第 15 図



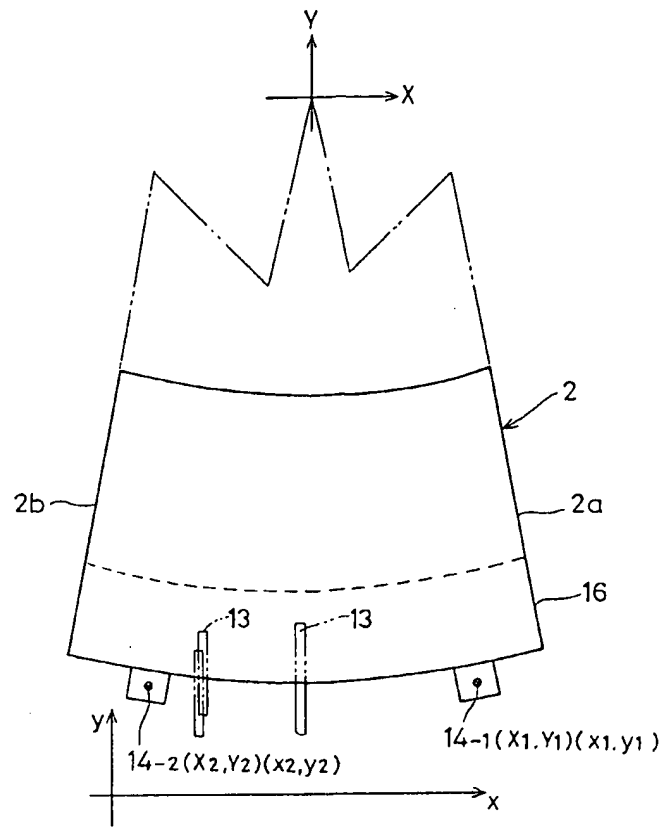
第11図中の偏向電磁石を示す図

第 12 図



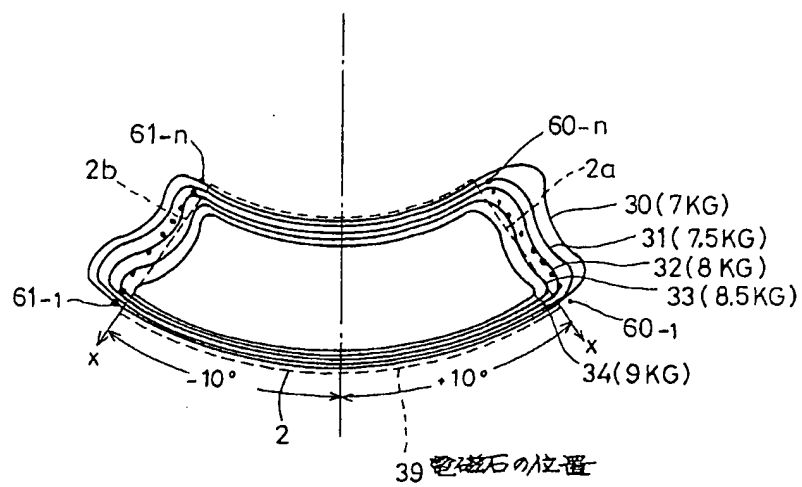
第12図の偏向電磁石の横分磁場強度分布を示す図

第 13 図



電磁石の座標系と測定座標系との関係を示す図

第 16 図



測定によって得た磁場分布を示す図

第 17 図